



**Некоммерческое партнерство
«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СОВЕТ
Единой энергетической системы»**

111 250, Москва, проезд Завода Серп и Молот,
дом 10, офис 608, Тел. (495) +7 495 012 60 07
E-mail: dtv@nts-ees.ru, <http://www.nts-ees.ru/>
ИНН 7717150757



Основана в 1724 году

**Российская Академия Наук
Секция по проблемам НТП в энергетике
Научного совета РАН по
системным исследованиям в энергетике**

УТВЕРЖДАЮ

Президент, Председатель
Научно-технической коллегии,
д.т.н., профессор

Н.Д. Роголев

« 05 » февраля 2025 г.

ПРОТОКОЛ № 1

совместного заседания Секции «Активные системы распределения
электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС» и
Секции по проблемам НТП в энергетике Научного совета РАН по системным
исследованиям в энергетике

22 января 2025 года

г. Москва

Присутствовали: члены секции «Активные системы распределения
электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС»,
представители ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ», ФГБУН «ИНЭИ РАН», ФГБУН
«ИСЭМ СО РАН», АО «НТЦ ФСК ЕЭС», Комитет ВИЭ РосСНИО, ГБОУ ВО
«Нижегородский государственный инженерно-экономический университет»,
ФГБОУ ВО «Нижегородский ГТУ им. Р.Е. Алексеева», ФГБОУ ВО
«Новосибирский государственный технический университет», ФГАОУ ВО
«Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина», ФГБОУ ВО
«Сибирский федеральный университет», ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский Томский политехнический университет», ФГБОУ ВО
«Казанский государственный энергетический университет», ФГБОУ ВО
«МИРЭА – РТУ», ООО «РТСофт-СГ», всего **45** человек.

Со вступительным словом выступил председатель секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы», руководитель Центра интеллектуальных электроэнергетических систем и распределенной энергетики ФГБУН «Институт энергетических исследований РАН», д.т.н. Илюшин П.В.

Во вступительном слове было отмечено, что в настоящее время распределительные электрические сети трансформируются из пассивных в активные. Это обусловлено как ростом установленной мощности объектов распределенной энергетики (микрогенерации), в том числе на основе возобновляемых источников энергии, так и участием потребителей электроэнергии в управлении электропотреблением. Интеграция в распределительные сети большого количества объектов распределенной энергетики требует решения проблемных технических вопросов, связанных с неоднократным изменением направления потоков мощности в течение суток в различных схемно-режимных ситуациях. В этих условиях актуальность представленных в докладе результатов, направленных на решение вопросов расчетного анализа установившихся режимов, не вызывает сомнений. Они могут быть использованы как в системах централизованного электроснабжения, так и в изолированных энергорайонах и системах внутреннего электроснабжения крупных промышленных предприятий, например, нефтегазовой отрасли. Решение поставленных задач возможно за счет повышением наблюдаемости распределительных сетей среднего напряжения, однако при этом требуется применение корректных математических моделей.

С докладом «**Потоковая модель в задачах расчёта и анализа установившихся режимов распределительных сетей**» выступил Банных Павел Юрьевич, к.т.н., доцент кафедры Автоматизированных электрических систем ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина».

Основные положения доклада приведены ниже. Презентация доклада прилагается (**Приложение 1**).

1. Представлена потоковая модель установившегося режима. Потоковая модель – это набор нелинейных уравнений, который описывает установившийся режим электрической сети. Она является альтернативой уравнениям узловых напряжений. Исходная информация и результат расчёта для потоковой модели и уравнений узловых напряжений совпадают. В качестве неизвестных в потоковой модели используются:

- активные мощности условного начала ветвей;
- реактивные мощности условного начала ветвей;
- модули напряжений в узлах электрической сети.

В потоковой модели больше уравнений и неизвестных по сравнению с уравнениями узловых напряжений, при этом потоковая модель обладает лучшими вычислительными характеристиками.

2. В потоковой модели используется следующий набор уравнений:

– уравнения баланса по активной мощности (составляются для каждого узла, кроме балансирующего);

– уравнения баланса по реактивной мощности (составляются для узлов с фиксированной активной и реактивной мощностью);

– уравнения падения напряжения (составляются для каждой ветви в графе сети);

– контурные уравнения (составляются для всех линейно-независимых контуров в графе сети).

3. Потоковая модель может быть применена в расчётных задачах, связанных с установившимися режимами: расчёты режимов, оптимизация режимов, оценка состояния. Преимущества потоковой модели проявляются на моделях распределительных сетей, характерными особенностями которых являются: радиальная структура, линии различной длины, соотношение индуктивного к активному сопротивлению близко к единице.

4. Принципиальным отличием потоковой модели от классических уравнений узловых напряжений является: исключение углов напряжений из вектора неизвестных и лучшие вычислительные характеристики.

5. Исключение фазовых углов напряжений и замена их на потоки мощности в ветвях упрощает учёт измерительной информации, которая доступна в распределительных сетях. Фазовые углы возможно непосредственно измерить только с помощью технологии векторных измерений, которая на сегодняшний день используется только в системообразующих сетях. При этом технологии измерения потоков мощностей по линиям давно разработаны и общедоступны.

6. Потоковая модель нечувствительна к неоднородности сопротивлений в схеме замещения электрической сети. Данное преимущество актуально для схем, в которых:

– присутствуют линии с различной длиной;

– соотношение реактивного к активному сопротивлению близко к единице;

– схемы с автотрансформаторами (у которых сопротивление обмотки среднего напряжения близко к нулю);

– присутствуют элементы с нулевыми сопротивлениями (коммутационные аппараты с устройствами измерения).

Подобные свойства потоковой модели объясняются тем, что сопротивления присутствуют в выражениях для потерь мощности и в выражениях для

составляющих падения напряжения. Потери мощности (напряжения) не превышают значений самих мощностей (напряжений), из-за этого не возникает разно-размерности величин, которая приводит к плохой обусловленности.

Лучшая обусловленность потоковой модели по сравнению классическими уравнениями узловых напряжений позволяет быстрее сходиться итерационным расчётным процедурам (расчёт установившегося режима, оценка состояния, задачи оптимизации).

7. К недостаткам потоковой модели следует отнести:

- увеличенная размерность системы уравнений потоковой модели по сравнению с уравнениями узловых напряжений;
- уравнения потоковой модели сложнее классических режимных уравнений, как следствие для потоковой модели сложнее выполнить алгоритмизацию расчёта и программную реализацию;
- для составления уравнений потоковой модели требуется применение алгоритмов анализа электрической сети для составления контурных уравнений;
- невязки уравнений потоковой модели имеют различные размерности, что ухудшает обусловленность без применения относительных единиц.

8. Для решения проблемы увеличенной размерности разработан алгоритм сортировки порядка уравнений и переменных. Он позволяет сократить появление ненулевых элементов на шаге итерационных методов (расчёт установившихся режимов и оптимизационных задач) и сократить вычислительную сложность одной итерации.

9. Наиболее актуальными задачами, где важна скорость выполнения расчёта режима, являются:

- вариантыные расчёты установившихся режимов электрических сетей;
- задачи дискретной оптимизации: оптимальная конфигурация сети, размещение средств компенсации реактивной мощности (СКРМ), выбор оптимальных коэффициентов трансформации и состояния, расчёт показателей надежности.

10. При проведении большого числа расчётов на одной схеме при применении потоковой модели:

- рассмотрение различных конфигураций схемы может быть выполнено за счёт изменения сопротивлений, что не сказывается на результатах расчётов в случае потоковой модели;
- анализ графа электрической сети достаточно выполнить всего один раз;
- сортировки уравнений и неизвестных для ускорения расчёта достаточно выполнить всего один раз;
- уменьшение числа итераций ощутимо сказывается на времени выполнения расчёта.

11. В задачах оптимизации в потоковой модели очень легко учитывать ограничения на напряжения в узлах и потоки мощности в ветвях. Это связано с тем, что данные величины непосредственно присутствуют в векторе неизвестных и ограничения на эти величины являются простыми и линейными. Кроме того, если целевая функция содержит только перетоки мощности, то она является линейной в потоковой модели. Это открывает возможность для применения методов последовательного линейного программирования и последовательного квадратичного программирования в задачах оптимизации. В основе этих методов лежит идея линеаризация системы нелинейных ограничений в форме равенства и сведение задачи к стандартной задаче линейного программирования, которая может быть решена широко известными и высокоэффективными методами.

12. В ходе работ над задачами оптимизации с учётом статических характеристик нагрузки по напряжению был выявлен эффект роста потерь в сети с ростом напряжения. Это объясняется тем, что с ростом напряжения растёт и нагрузка в сети, а с ростом нагрузки и перетоков увеличиваются потери в сети.

13. Для учёта несимметрии в режимах распределительных сетей была разработана трехфазная потоковая модель. Вектор искомым переменных расширяется с однолинейных параметров (трехфазная мощность, линейное напряжение, фазные сопротивления) на трёхфазные (пофазные мощности и напряжения), а также в вектор неизвестных добавляются междуфазные углы. Состав уравнений остаётся аналогичным, изменяются только выражения потерь мощности и падения напряжения. Добавляются уравнения изменения угла на линии, для учёта междуфазных углов.

14. Расчёты режимов распределительных сетей с несимметрией электрического режима в фазных координатах показывают, что возможны ситуации, когда обобщенные трехфазные параметры находятся в допустимых диапазонах. При этом, при рассмотрении фазных параметров в несимметричных режимах возможен выход за допустимые границы.

15. Существует проблема использования уравнений узловых напряжений в сетях с изолированной нейтралью. Она связана с тем, что в отсутствие связи с землёй фрагментов схемы наблюдается численная неустойчивость, поскольку все напряжения становятся электрически не связанными с точкой нулевого потенциала. При переходе в потоковую модель данная проблема отсутствует, поскольку все напряжения учтены через уравнения падения напряжения от базы.

16. Численные эксперименты на различных тестовых схемах показывают высокую вычислительную устойчивость и скорость расчёта потоковой модели по сравнению с другими методами расчёта установившегося режима распределительных сетей с учётом несимметрии. На сходимость и численную устойчивость различных расчётных методов могут оказывать влияние

следующие факторы: наличие замкнутых контуров в схеме сети, фрагменты сети с изолированной нейтралью, величина несимметрии, наличие узлов с фиксированным напряжением (генераторные узлы и узлы с устройствами FACTS). В случае с потоковой моделью все эти факторы не оказывают влияния на сходимость и число итераций.

17. Разработана гибридная трехфазно-однолинейная (ГТО) потоковая модель установившегося режима, которая позволяет объединить в единой расчётной процедуре фрагменты в однолинейном и трехфазном представлении. В ряде задач имеет смысл представлять системообразующую сеть в однолинейном представлении, а распределительную сеть в трехфазном. Это позволяет сбалансировать размерность задачи и достичь требуемой точности расчёта.

18. С точки зрения математического аппарата, описывающего гибридную трехфазно-однолинейную потоковую модель, добавляется интерфейсный узел, объединяющий пофазное и однолинейное представление. Добавляется уравнение баланса объединяющее пофазные и трехфазную мощность. Также добавляется уравнение, связывающее фазные напряжения с усреднённым однолинейным напряжением. Могут быть использованы различные подходы для получения связи моделей по напряжению. Наиболее простым является усреднение фазных напряжений. Также возможен расчёт напряжения прямой последовательности на основании фазных значений напряжений.

19. Численные эксперименты показывают эффективность применения ГТО модели в задачах расчёта установившихся режимов. Точность модели зависит от степени несимметрии в узле интерфейса, которые соединяет трехфазное и однолинейное представление сети. При различии фазных напряжений менее чем на 10% погрешность от использования ГТО модели не превышает 5% и может быть использована в задачах моделирования режимов.

20. ГТО модель может быть использована в задаче оценивания состояния. На сегодняшний день в распределительных сетях присутствуют различные измерительные комплексы, как с измерением усреднённых параметров, так и с измерением точных параметров по фазам. В ГТО модели появляется возможность использовать разнородную измерительную информацию из разных участков электрической сети в рамках единой расчётной процедуры, что позволяет точнее наблюдать режим.

21. В результате выполнения разработки и исследования потоковой модели получены следующие результаты:

- разработаны уравнения потоковой модели, которая может быть использована в задачах расчёта и анализа установившихся режимов;
- потоковая модель обладает лучшими вычислительными характеристиками по сравнению с классическими уравнениями узловых

напряжений применительно к распределительным сетям;

- разработана трехфазная потоковая модель, позволяющая учитывать несимметричные установившиеся режимы распределительных сетей;

- разработана гибридная трехфазно-однолинейная потоковая модель, которая позволяет объединить в единой расчётной процедуре фрагменты сети в трехфазном и однолинейном представлении.

В обсуждении доклада и прениях выступили:

Гусев Ю.П., (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»»), Рабинович М.А., Воротницкий В.Э. (АО «Россети Научно-технический центр»), Сидоров С.М. (ФГБОУ ВО «МИРЭА – РТУ»), Голуб И.И. (ФГБУН «ИСЭМ СО РАН»), Паздерин А.В. (ФГАОУ ВО «УрФУ»), Илюшин П.В. (ФГБУН «ИНЭИ РАН»).

Гусев Ю.П. – Профессор кафедры «Электрические станции» ФГБОУ «НИУ «МЭИ»», к.т.н., профессор.

Обратил внимание на актуальность учета емкостных токов замыкания на землю при моделировании, в связи с ростом протяженности кабельных линий электропередачи в распределительных сетях, например, г. Москвы.

Отметил, что игнорирование емкостной составляющей при моделировании приводит к ошибкам в балансе реактивной мощности, в регулировании напряжения и в выборе уставок устройств РПН силовых трансформаторов.

Обратил внимание, что одним из негативных факторов в отечественной электроэнергетике, усложняющим проектирование и эксплуатацию электрооборудования, а также управление режимами распределительных сетей, является отсутствие единого программного комплекса расчетов режимов.

Рабинович М.А. – Главный научный сотрудник АО «Россети Научно-технический центр», д.т.н.

Обратил внимание, что элементы математической модели с «нулевым» сопротивлением, например, высоковольтные выключатели, разъединители и другие коммутационные аппараты учитываются посредством соответствующих математических выражений со значениями R и X равными нулю.

Отметил, что применение потоковой модели имеет перспективы применения в распределительных сетях среднего напряжения при условии, что они будут оснащаться средствами управления параметрами режима, позволяющими реализовать результаты оптимизационных расчетов.

Сидоров С.М. – Доцент кафедры прикладной математики Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – РТУ», к.т.н.

Обратил внимание, что при линеаризации нелинейных уравнений погрешность вычислений остается в допустимых пределах.

Отметил необходимость апробации результатов расчетов установившихся режимов на реальных схемах распределительных сетей разной конфигурации, протяженности линий электропередач, направлений потоков мощности и др.

Воротницкий В.Э. – Главный научный сотрудник АО «Россети Научно-технический центр», д.т.н., профессор.

Отметил, что в представленном докладе производилось моделирование распределительных электрических сетей среднего напряжения.

Обратил внимание, что в распределительных сетях 6 кВ и выше наблюдаемость параметров напряжения, а также активной и реактивной мощности в узлах нагрузки в настоящее время зачастую отсутствует.

Отметил, что в ходе работы были рассмотрены и рассчитаны с помощью потоковой модели схемы замещения с различным количеством узлов и ветвей. При этом результаты расчета имели высокую степень сходимости.

Обратил внимание, что для оценки практической значимости применения потоковой модели необходимо провести с ее помощью расчеты используя фрагменты реальных распределительных сетей.

Обратил внимание, что при моделировании необходимо учитывать несимметричность режимов.

Голуб И.И. – Ведущий научный сотрудник Отдела электроэнергетических систем ФГБУН «ИСЭМ СО РАН», д.т.н., профессор.

Обратила внимание, что для применения потоковой модели требуется повышения наблюдаемости в распределительных сетях среднего напряжения. На текущий момент количество датчиков параметров режима, необходимых для корректного функционирования потоковой модели, крайне ограничено.

Отметила, что одним из способов повышения наблюдаемости распределительной сети является интеграция автоматизированной информационно-измерительной системы контроля и учета электроэнергии и системы диспетчерского управления и сбора данных. Это позволит не устанавливать дополнительные датчики.

Паздерин А.В. – Заведующий кафедрой «Автоматизированные электрические системы» ФГАОУ ВО «УрФУ», д.т.н., профессор.

Обратил внимание, что одним из недостатков моделей, использующих классические уравнения установившегося режима, является отсутствие

сходимости режима при проведении расчетов в распределительных сетях напряжением 6-10 кВ. Данный недостаток в потоковой модели отсутствует.

Отметил, что развитие данного научного направления является перспективным, учитывая тренды на цифровизацию электросетевого комплекса, которые включены в техническую политику ПАО «Россети» и поэтапно реализуются во всех ДЗО ПАО «Россети».

Илюшин П.В. – Председатель секции «АСРЭ и РЭР», руководитель Центра интеллектуальных электроэнергетических систем и распределенной энергетики ФГБУН «Институт энергетических исследований РАН», д.т.н.

Обратил внимание, что в представленных в презентации схемах замещения направление перетоков мощности однонаправленные. Однако на практике направление мощности зачастую разнонаправленное, при этом объект распределенной энергетики, подключенный к отпайке, может полностью компенсировать нагрузку, расположенную справа от отпайки и частично компенсировать нагрузку слева. При этом переток мощности через понижающий трансформатор на подстанции не изменяется и однонаправлен.

Отметил, что для обеспечения корректности расчетов режимов в распределительной сети измерения активной и реактивной мощностей, а также модуля напряжения, должны производиться сразу за отпайкой на ЛЭП.

Обратил внимание, что применение реклоузера для обеспечения измерений активной и реактивной мощности на отпайке ЛЭП является экономически нецелесообразным решением. В международной практике известны технические решения с установкой соответствующих датчиков активной и реактивной мощности на провода ЛЭП.

Обратил внимание, что для реализации результатов оптимизационных расчетов режимов распределительных сетей количество устройств управления режимами должно возрастать.

Отметил, что в распределительных сетях трасса ЛЭП может состоять из проводов различных типов и сечения, в связи с чем определение параметров схемы замещения ЛЭП затруднительно, а результаты расчетов, без корректного учета этих особенностей, могут иметь большую погрешность.

Обратил внимание, что на вводимых цифровых подстанциях на каждом присоединении устанавливаются цифровые терминалы релейной защиты и автоматики, имеющие информацию о потоках активной и реактивной мощности.

Заслушав выступления экспертов по результатам дискуссии совместное заседание Секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС» и Секции по

проблемам НТП в энергетике Научного совета РАН по системным исследованиям в энергетике **отмечает:**

1. Разработанная потоковая модель установившегося режима позволяет эффективно решать задачи расчёта и оптимизации режимов распределительных сетей с учётом специфики радиальной структуры и соотношения параметров активных и реактивных сопротивлений элементов, а также учитывать элементы с нулевым сопротивлением без ухудшения вычислительных характеристик.

2. Разработанная трехфазная потоковая модель позволяет рассчитывать режимы распределительных сетей с учётом несимметрии параметров режима и схемы замещения. Имеется возможность учитывать различные режимы с изолированной нейтралью силовых трансформаторов без влияния на сходимость итерационных методов расчёта.

3. Разработанная гибридная трехфазно-однолинейная потоковая модель позволяет решать задачи расчёта режима и оценивания состояния используя и пофазные, и усреднённые измерения. Это даёт возможность использовать всю полноту измерительной информации и даёт более точную информацию о состоянии рассматриваемой распределительной сети.

Совместное заседание Секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС» и Секции по проблемам НТП в энергетике Научного совета РАН по системным исследованиям в энергетике **решило:**

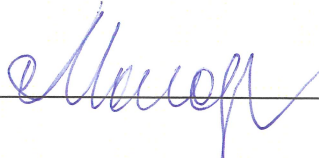
1. Рекомендовать автору учесть высказанные рекомендации по доработке предложенных моделей и алгоритмов. Необходимо провести верификацию применения потоковой модели для реальных распределительных сетей с учётом фактического информационного обеспечения в части параметров схемы замещения и измерительной информации параметров электрического режима.

2. Рекомендовать электросетевым компаниям рассмотреть возможность применения разработанной потоковой модели в качестве компонента системы управления режимами активных распределительных сетей. Потоковая модель позволяет эффективно с вычислительной точки зрения решать основные расчётные задачи в части управления электрическими режимами распределительных сетей.

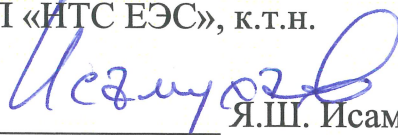
С заключительным словом выступил председатель секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС», д.т.н. Илюшин П.В., в котором отметил особую важность повышения наблюдаемости и управляемости в активных распределительных сетях среднего напряжения. Это обусловлено

возрастающими объемами вводов объектов распределенной энергетики (микрогенерации), в том числе на основе ВИЭ, а также накопителей электроэнергии, что в свою очередь требует внедрения систем автоматического управления режимами. Внедрение устройств управления режимами с элементами силовой электроники позволяет обеспечить поддержание требуемых показателей качества электроэнергии на шинах потребителей в различных схемно-режимных ситуациях. Для решения задач оптимизации режимов следует уделять должное внимание вопросам корректного моделирования установившихся режимов в активных распределительных сетях.


Первый заместитель Председателя
Научно-технической коллегии
НП «НТС ЕЭС», д.т.н., профессор


В.В. Молодюк

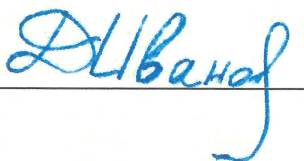
Ученый секретарь
Научно-технической коллегии
НП «НТС ЕЭС», к.т.н.


Я.Ш. Исамухамедов

Председатель секции «АСРЭ и РЭР»
НП «НТС ЕЭС», ученый секретарь
Секции по проблемам НТП в энергетике
Научного совета РАН по системным
исследованиям в энергетике, д.т.н.


П.В. Илюшин

Ученый секретарь секции
«Активные системы распределения
электроэнергии и распределенные
энергетические ресурсы» НП «НТС
ЕЭС», к.т.н.


Д.А. Ивановский